

## REFUERZO HÍBRIDO (ACERO Y POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS) EN VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO.

**Isel del Carmen Díaz Pérez<sup>1</sup>, Manuel Alejandro Amador Núñez<sup>2</sup>, Jorge Julio Martínez González<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Ingeniera Civil, Máster en Ciencias, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), Calle 114 e/ Ciclovía y Rotonda; [iselcarmen@civil.cujae.edu.cu](mailto:iselcarmen@civil.cujae.edu.cu)

<sup>2</sup> Ingeniero Civil. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), Calle 114 e/ Ciclovía y Rotonda, [malejandro@tesla.cujae.edu.cu](mailto:malejandro@tesla.cujae.edu.cu)

<sup>3</sup> Ingeniero Civil. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), Calle 114 e/ Ciclovía y Rotonda, [jmartinezq@civil.cujae.edu.cu](mailto:jmartinezq@civil.cujae.edu.cu)

### RESUMEN

*El empleo de barras de polímeros reforzados con fibras (PRF) como refuerzo en elementos de hormigón se ha convertido en una alternativa viable para garantizar una mayor resistencia y durabilidad en las estructuras debido fundamentalmente a la elevada resistencia a tracción, bajo peso y alta resistencia a la corrosión que estas poseen. Sin embargo, presentan una significativa fragilidad que ha conducido a los investigadores a valorar alternativas como combinar barras de acero y PRF en el armado, bajo el concepto de un refuerzo híbrido, capaz de aprovechar las ventajas que brindan ambos materiales y aumentar la ductilidad de los elementos. Actualmente no existe en los reglamentos una metodología que permita el cálculo de este tipo de refuerzo, por lo que el presente trabajo tiene como objetivo brindar una propuesta, a partir de los modelos analíticos e hipótesis definidas en los códigos ACI 318-14 y ACI 440 1R-15, para el diseño de elementos de hormigón armado con acero y PRF respectivamente. El análisis de los diagramas de deformaciones y la caracterización de las fallas balanceadas para cada uno de los materiales permiten identificar una región común que servirá como punto de partida para el cálculo de las áreas de ambos refuerzos. La metodología propuesta, desarrollada a través de una herramienta de cálculo computacional y aplicada en un ejemplo, demuestra que es posible concebir un refuerzo combinado con acero y PRF, dando cumplimiento a los requisitos de diseño establecidos por los reglamentos para cada material.*

**Palabras claves:** ductilidad, vigas de hormigón armado, polímeros reforzados con fibras (PRF), refuerzo híbrido.

## HYBRID REINFORCEMENT (STEEL AND FIBER REINFORCED POLYMER) IN REINFORCED CONCRETE BEAMS.

### ABSTRACT

*The use of fiber reinforced polymer bars (FRP) as reinforcement in concrete elements has become a viable alternative to ensure greater strength and durability in the structures due mainly to the high tensile strength, low weight and high resistance to the corrosion that they have. However, they present a significant fragility that has led researchers to evaluate alternatives such as combining steel bars and PRF in the assembly, under the concept of a hybrid reinforcement, able to take advantage of both materials and increase the ductility of the elements. Currently there is no methodology in the regulations that allows the calculation of this type of reinforcement, so the present work aims to provide a proposal, from the analytical models and hypotheses defined in the codes ACI 318-14 and ACI 440 1R-15 for the design of reinforced concrete elements with steel and PRF respectively. The analysis of the deformation diagrams and the characterization of the balanced faults for each of the materials allow identifying a common region that will serve as a starting point for the calculation of the areas of both reinforcements. The proposed methodology, developed through a computational calculation tool and applied in an example, demonstrates that it is possible to conceive a reinforcement combined with steel and PRF, complying with the design requirements established by the regulations for each material.*

**Keywords:** ductility, fiber reinforced polymers (FRP), hybrid reinforcement, reinforced concrete beams.

**Nota Editorial:** Recibido: febrero 2020; Aceptado: mayo 2020

## 1. INTRODUCCIÓN

La resistencia de las estructuras de hormigón armadas con refuerzo convencional se reduce progresivamente debido a la degradación de las barras de acero por corrosión. Las barras de PRF presentan entre sus principales propiedades: elevada resistencia a corrosión, alta resistencia a tracción y bajo peso propio, por lo que siguen siendo el mejor reemplazo para las barras de acero, sobre todo cuando se trata de severas condiciones ambientales como las de Cuba. Sin embargo, su bajo módulo de elasticidad y el carácter frágil que presentan al colapsar reduce la ductilidad de los elementos de hormigón armados con estas barras.

Con el objetivo de revertir el problema de la fragilidad de estos diseños, en los últimos años se han venido desarrollado investigaciones [1-8] proponiendo soluciones prácticas y tecnológicas para incrementar la ductilidad de los elementos armados con PRF. La incorporación del acero [2, 3, 6, 7], el aumento de las cuantías de refuerzo o el empleo de barras de acero recubiertas de polímeros reforzados con fibras se destacan entre ellas [1, 4, 8]. Los resultados de los mismos conducen a pensar que la solución del refuerzo híbrido, por empleo de barras de acero y PRF simultáneamente, en una o diferentes capas dispuestas en la sección transversal, es una solución factible. El incremento en ductilidad de las vigas, la disminución de la fisuración, así como la mayor resistencia a las elevadas temperaturas, constituye algunas de las ventajas de este tipo de refuerzo.

A pesar de que existen numerosas analogías en las filosofías de diseño empleadas para definir las cuantías de refuerzo, los modelos analíticos que se proponen para el diseño con cada uno de estos refuerzos [9, 10] tienen diferencias que no deben desestimarse. El diseño de elementos de hormigón armado reforzado con barras de acero conduce generalmente a secciones hiporreforzadas, con tal de asegurar que el acero alcance la fluencia antes de producirse el fallo por aplastamiento del hormigón, pues con la entrada en fluencia del acero se asegura una adecuada ductilidad y, en consecuencia, la posibilidad de avizorar la inminencia de un probable fallo. Sin embargo, el comportamiento elástico del refuerzo en base a PRF y su fragilidad en el fallo exigen, un cambio en esa filosofía de diseño. Cuando se refuerza con barras de PRF, las razones anteriores conducen a preferir que el fallo por compresión del hormigón se adelante al del refuerzo, a pesar de que el primero de ambos presenta también cierta fragilidad [11].

Teniendo en cuenta las bondades que desde el punto de vista de la ductilidad ofrece la combinación de ambos refuerzos y las diferencias existentes entre ambas filosofías de diseño, el presente trabajo propone un procedimiento para el diseño de vigas de hormigón armado con refuerzo combinado de acero y PRF a partir del desarrollo de las ecuaciones de equilibrio, compatibilidad y las leyes constitutivas de ambos tipos de refuerzo, dando cumplimiento a los requisitos de diseño establecidos por los reglamentos [9, 10] para cada material.

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Consideraciones generales para la confección del modelo analítico.

El diseño a flexión de elementos con refuerzo combinado de acero y PRF debe satisfacer las bases de diseño de los estados límites de resistencia, es decir, asegurar que la sollicitación actuante ( $M_u$ ), determinada a partir de la combinación más desfavorable de las acciones exteriores, luego de mayorar sus valores característicos mediante los respectivos coeficientes de carga, no exceda a la sollicitación resistente de la sección calculada a partir de la resistencia reglamentaria de los materiales ( $M_n$ ), afectando su magnitud por el factor de reducción de resistencia ( $\phi$ ):

$$M_u \leq \phi(M_n) \tag{1}$$

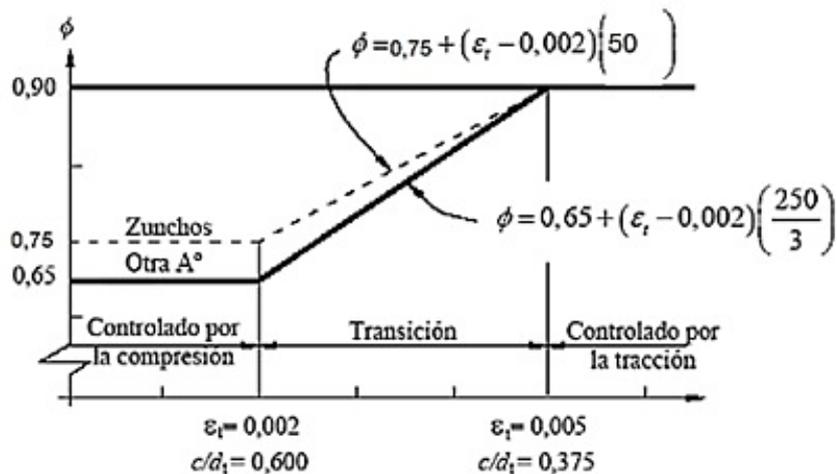
No obstante, existen numerosas singularidades que no deben ser obviadas en los casos que se decida reforzar al hormigón mediante barras de PRF y de acero. A continuación, se presentan las de mayor importancia para cada uno de estos materiales:

Consideraciones para el cálculo con acero:

Los esfuerzos en los aceros naturales por debajo de la resistencia de fluencia especificada para el grado de acero utilizado serán tomados según la ley de Hooke, como el producto del módulo de deformación del acero ( $E$ ) por la deformación unitaria del acero ( $\epsilon_s$ ). Para deformaciones mayores que la correspondiente a la tensión de fluencia ( $f_y$ ), el esfuerzo en el acero se considerará independiente de la deformación e igual a  $f$ , considerándose además una deformación máxima en el acero ( $\epsilon_{smax}$ ) del 1%. (Diagrama bilineal).

El diseño se recomienda se realice para secciones en tracción controlada, definiéndose esta como aquella región donde la deformación unitaria neta a tracción del acero de refuerzo a tracción es suficientemente grande ( $\epsilon_s \geq 0,005$ ) y para la cual se puede esperar una clara advertencia previa de falla con deformaciones y fisuración

excesivas. Debe destacarse que el límite de 0,005 provee suficiente ductilidad en la mayoría de los casos [12]. En esta región el coeficiente reductor de la capacidad nominal ( $\phi$ ) adopta un valor constante, igual a 0,9 (ver Figura 1).



**Figura 1:** Variación de  $\phi$  con deformación  $\epsilon_s$  del acero más traccionado, para el caso de las sollicitaciones normales [12]

Consideraciones para el cálculo con PRF:

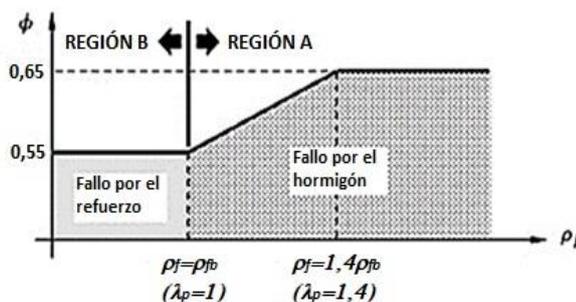
Al diseñar con PRF la tendencia es fijar la cuantía de refuerzo PRF en tracción ( $\rho_f$ ) como una fracción de la cuantía balanceada ( $\rho_{fb}$ ), definida esta última como aquella cantidad de refuerzo ( $A_{fb}$ ) que asegura de modo simultáneo que el hormigón alcance su máxima deformación a compresión ( $\epsilon'_{cu} = 0,003$ ), mientras que la barra de PRF alcanza su deformación última ( $\epsilon_{fu}$ ) [10, 11]. Siendo así se pueden definir dos regiones de diseño:

Región A: ( $\rho_f \geq \rho_{fb} \Rightarrow \lambda_p \geq 1$ )

Región B: ( $\rho_f < \rho_{fb} \Rightarrow \lambda_p < 1$ )

En general se procura que el fallo por compresión del hormigón se adelante al del refuerzo ( $\rho_f \geq \rho_{fb}$ ). Los diseños asociados a esta región presentan menor fragilidad, al disponerse una superficie de refuerzo suficientemente alta como para garantizar que el mismo alcance niveles de esfuerzo relativamente bajos, asegurando de esta manera una reserva de sobrecarga que estaría limitada por la deformación de rotura del refuerzo, y con ello alejar la probabilidad de un fallo súbito del elemento. En ningún caso debe aceptarse que el fallo de la sección acontezca sin que la barra de refuerzo en tracción alcance, al menos, una deformación igual a 0,005 ( $\epsilon_f \leq 0,005$ ) [10].

Debido a que los elementos de hormigón reforzados con barras de PRF no se caracterizan por un comportamiento dúctil, debe adoptarse un factor reductor  $\phi$  que garantice una mayor reserva de resistencia que la que se acostumbra asegurar en hormigón armado con acero (Figura 2). En el caso del refuerzo en base a barras de PRF se hace depender este factor de la relación entre la cuantía del refuerzo en tracción que se proponga al diseño ( $\rho_f$ ), y la cuantía balanceada ( $\rho_{fb}$ ), o sea, del parámetro  $\lambda_p$ :



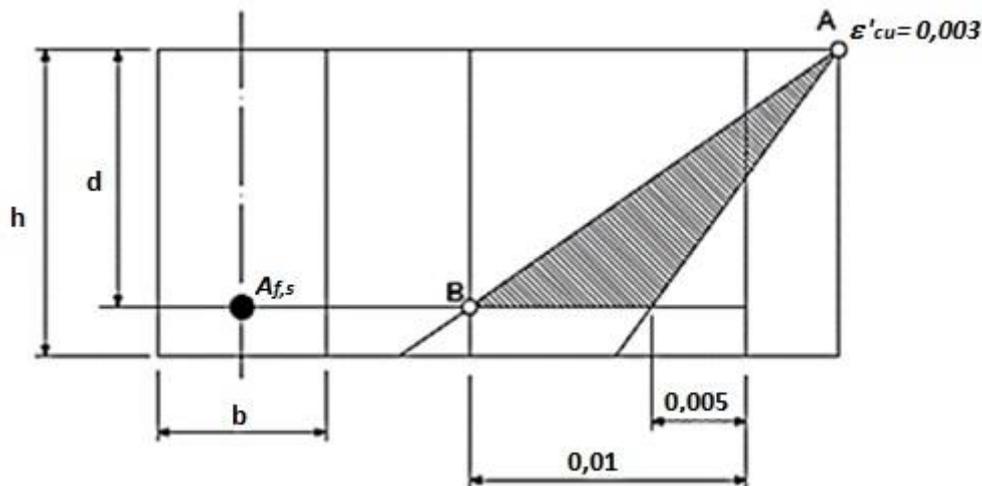
**Figura 2:** Representación gráfica del coeficiente reductor de la capacidad nominal para las PRF [11]

$$\phi = \begin{cases} 0,55 & \text{Si } \lambda_p \leq 1 \\ 0,3 + 0,25\lambda_p & \text{Si } 1 < \lambda_p < 1,4 \\ 0,65 & \text{Si } \lambda_p \geq 1,4 \end{cases} \quad (2)$$

**2.2. Región definida para el cálculo de refuerzo híbrido.**

Las hipótesis establecidas para la construcción del diagrama de dominios como herramienta para el diseño con ambos refuerzos respectivamente, así como las consideraciones antes planteadas, permiten definir una región común para el cálculo con refuerzo combinado (Figura 3). La misma se caracteriza porque el hormigón presenta una deformación  $\epsilon'_c = 0,003$ , la cual va a constituir un punto fijo en el diagrama; la deformación máxima asociada al refuerzo dada por el máximo valor de deformación del acero ( $\epsilon_{smax}$ ) igual a 0,01, y la deformación mínima definida como límite para la tracción controlada en el caso del acero ( $\epsilon_s \geq 0,005$ ) y mínima para el polímero ( $\epsilon_f \leq 0,005$ ), según lo expresado en las consideraciones.

De esta manera, relacionando las deformaciones se puede confeccionar un diagrama de dominios que facilite el cálculo del refuerzo híbrido como se muestra a continuación:



**Figura 3:** Diagrama de dominio definido para el cálculo de refuerzo híbrido

Los valores de deformaciones límites antes definidos permiten determinar los valores de profundidad de la línea neutra ( $c$ ) asociados a ambas fronteras a partir de la ecuación de compatibilidad:

$$\frac{\epsilon'_c}{c} = \frac{\epsilon_{s,f}}{d - c} \Rightarrow c = \frac{\epsilon'_c}{\epsilon'_c + \epsilon_{s,f}} \cdot d \quad (3)$$

quedando definidos en función del peralte efectivo de la sección entre los valores  $c = (0,231d$  y  $0,375d)$ .

**2.3. Metodología para el diseño de secciones rectangulares sometidas a flexión simple con refuerzo híbrido.**

Esta metodología parte de fijar inicialmente las dimensiones de la sección ( $b, h$ ) y se fundamenta en los criterios siguientes:

El peralte fijado y las condiciones de proyecto que se adopten, permiten diseñar sin requerir refuerzo estructural en compresión ( $A'_f = 0$ ), o sea, asegurando que  $d \geq d_{min}$ .

Considerar una sola camada de refuerzo.

El valor de profundidad de la línea neutra ( $c$ ) debe estar comprendido entre los valores definidos en el acápite anterior.

Siendo así, el modelo propuesto presupone el cumplimiento de los siguientes criterios:

Criterio de diseño:  $c (0,231d - 0,375d)$

Criterio de aceptación o rechazo:  $M_u \leq \phi M_n$

En relación al primero de estos dos criterios, se debe recordar que en la actualidad los documentos normativos continúan sugiriendo diseñar para cuantías del refuerzo en tracción superiores a la balanceada cuando se utilice al PRF como refuerzo, de manera tal que sobrevenga el fallo del hormigón antes que la ruptura frágil de las barras de refuerzo, mientras que al emplear acero se hace necesario que los diseños sean con cuantías inferiores a la balanceada con tal de garantizar la entrada en fluencia de las barras.

Con estos precedentes se propone la siguiente metodología para el diseño con refuerzo combinado ACERO - PRF:

- i. Determinación del peralte efectivo de la sección.  
Se dispondrá un peralte total de la sección de forma tal que no se requiera refuerzo en compresión.
- ii. Determinación del valor de profundidad de la línea neutra ( $c$ ).  
Se tomará un valor de profundidad de la línea neutra ( $c$ ) que permita garantizar las dos condiciones fundamentales propuestas para el diseño con refuerzo híbrido, o sea, garantizar que el acero se encuentre en fluencia y que el PRF no alcance su máxima deformación.
- iii. Cálculo de deformaciones y tensiones de trabajo para ambos refuerzos.
- iv. Determinación de los factores de reducción de capacidad resistente asociados al acero y al PRF respectivamente.
- v. Determinación de la cantidad de barras de PRF y acero en tracción.

El cálculo de las áreas de refuerzo en tracción de la sección se realiza partiendo de la ecuación de equilibrio de momento en la cual estarán incluidos los valores de las áreas de refuerzo de PRFV y de acero al mismo tiempo, resultando una sola ecuación con dos incógnitas:

$$M_n \leq \phi_s (A_s f_s * (d_{ss} - \frac{\beta_1 c}{2})) + \phi_f (A_f f_f * (d_{ff} - \frac{\beta_1 c}{2})) \quad (4)$$

Para darle solución a este problema se crea como alternativa una aplicación de cálculo que cumple con las condiciones anteriores y que facilita la obtención de los resultados (Figura 4). Su funcionamiento está basado en un proceso iterativo que permite acotar el número de iteraciones en función de las cantidades máximas y mínimas de barras de acero y PRF deseadas a colocar en la sección.

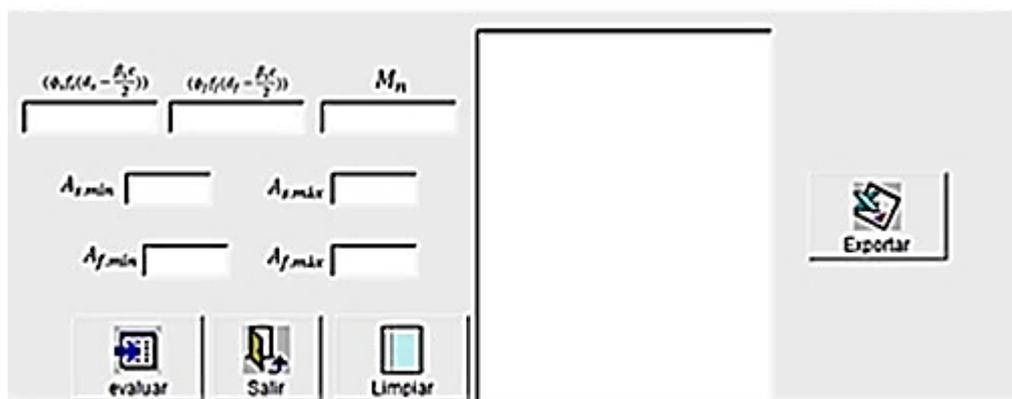


Figura 4: Herramienta computacional empleada para el cálculo

- vi. Distribución del refuerzo calculado en la sección.

Se realiza tomando en cuenta los criterios establecidos en [12].

### 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se propone el diseño de una viga de hormigón de sección transversal rectangular considerando para el refuerzo en tracción barras de acero y polímeros reforzados con fibras de vidrio (PRFV). La viga se encuentra apoyada directamente sobre columnas de  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  y debe vencer una luz de  $5,50 \text{ m}$ . Este elemento se desempeña en un ambiente de baja agresividad y se fijan para su diseño las siguientes condiciones:

Resistencia y densidad del hormigón:  $\begin{cases} f'_c = 25 \text{ MPa} \rightarrow \beta_1 = 0,85 \\ w_c = 24 \text{ KN/m}^3 \\ \text{Tamaño máximo del árido: } 19 \text{ mm} \end{cases}$

Características mecánicas del refuerzo:  $\begin{cases} \text{PRFV: } \begin{cases} f_{fu}^* = 800 \text{ MPa} \\ E_f = E_{fu}^* = 50\,000 \text{ MPa} \end{cases} \\ \text{Acero: } \begin{cases} f_y = 300 \text{ MPa} \\ E_s = 20 \cdot 10^5 \text{ MPa} \end{cases} \end{cases}$

Momento actuante  $M_u = 70,0 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Dimensiones de la sección: ancho ( $b = 200 \text{ mm}$ );

peralte ( $h \approx l/10 = 550 \text{ mm}$ ), fijado según [12]

Recubrimiento libre (neto) de refuerzo:  $r_n = 30 \text{ mm}$

Barras longitudinales:  $\begin{cases} \text{PRFV: No. 16} \rightarrow \phi_f = 16 \text{ mm}, A = 201 \text{ mm}^2 \\ \text{Acero: No. 16} \rightarrow \phi_s = 15,9 \text{ mm}, A = 199 \text{ mm}^2 \end{cases}$

Barras transversales: No. 10  $\rightarrow \phi_c = 10 \text{ mm}$

El diseño se realiza según la metodología propuesta en el presente trabajo.

Valorando que se dispondrán barras de acero y PRF en tracción de distintos diámetros y dispuestas todas en una camada, el recubrimiento mecánico (medido desde el paramento de la sección al centroide del refuerzo), varía según el tipo de refuerzo considerando:

Para PRF:  $d_f = 48 \text{ mm}$

Para Acero:  $d_s = 47,5 \text{ mm}$

En este caso los valores de  $d_f$  y  $d_s$  son diferentes aunque por muy poco margen, por lo que se selecciona el mayor de ambos (condición menos favorable), para calcular el valor de la altura efectiva de la sección:

$d_{ff} = 502 \text{ mm}$  (Estimado para una capa de refuerzo)

La profundidad de la línea neutra ( $c$ ), se determina partiendo de fijar un valor de profundidad relativa ( $k$ ) entre 0,231 y 0,375:  $k = 0,250 \Rightarrow c = 125,5 \text{ mm}$

A partir de las ecuaciones de compatibilidad y leyes constitutivas de ambos materiales se obtienen las deformaciones y tensiones respectivamente para ambos materiales:

Para el acero ( $\epsilon_s$ ):  $\epsilon_s = 0,009 > 0,0015 \therefore f_s = f_y = 300 \text{ MPa}$

Para el PRF ( $\epsilon_f$ ):  $\epsilon_f = 0,009$ ;  $f_f = \epsilon_f * E_f = 0,009 * 50000 = 450 \text{ MPa}$

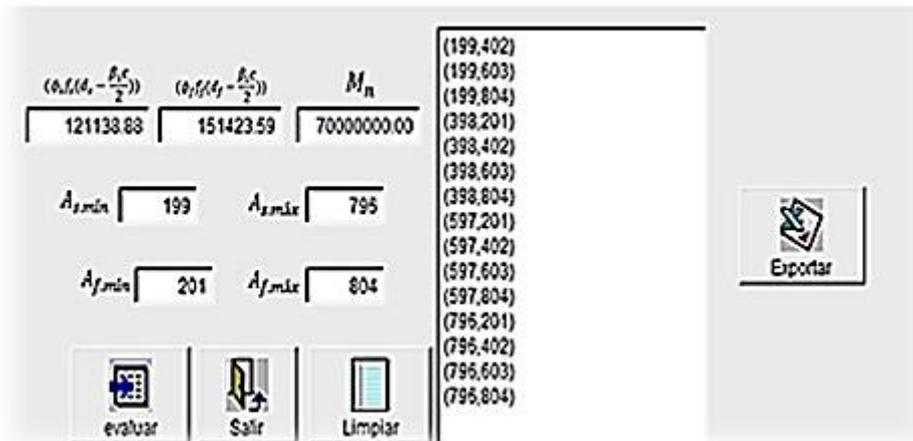
Los factores de reducción de capacidad resistente quedan definidos  $\phi_s = 0,9$  para el acero (Figura 1) y  $\phi_s = 0,65$  para el PRFV, partiendo de considerar en este refuerzo cuantías superiores a la balanceada (Figura 2).

El cálculo del número de barras de PRFV y acero en tracción necesarias para resistir los esfuerzos actuantes se realiza partiendo de la ecuación de equilibrio de momento y apoyándose en el programa de cálculo creado.

Es necesario definir un máximo número de barras a emplear para cada uno de estos materiales, ya que de no ser así se obtendrían infinitas soluciones. El cálculo se decide realizar para un máximo de cuatro barras para ambos tipos de refuerzos.

Al ingresar los datos en el programa se obtienen todas las posibles combinaciones de áreas para ambos refuerzos (pares  $A_s, A_f$ ) como resultado (Figura 5). Como criterios iniciales de aceptación, se consideran aquellos que permitan una simetría en la disposición del refuerzo de la sección y en los que aseguren deformaciones en el acero superiores a 0,004 (límite establecido por [10,13] que define una cuantía máxima de refuerzo) e inferiores a la deformación última en el caso del PRFV, procurando cuantías de PRFV superiores, a lo sumo iguales a las de acero. El segundo criterio se establece en función del valor de profundidad de la línea neutra ( $c$ ), tomándose como solución aquella que tenga menor diferencia (menor error)

con el valor de  $c$  inicialmente fijado.



**Figura 5:** Resultados del diseño

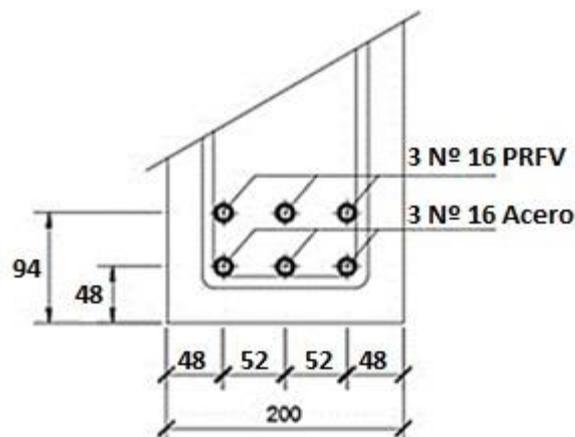
Finalmente se selecciona como solución al diseño:

$$\text{Acero: } A_s = 597 \text{ mm}^2; \phi_s = 3 \text{ barras No. 16}$$

$$\text{PRFV: } A_f = 603 \text{ mm}^2; \phi_f = 3 \text{ barras No. 16}$$

Con ello se ajusta el valor de línea neutra, quedando  $c = 124,69 \text{ mm}$ .

A partir de los resultados obtenidos se propone una distribución del refuerzo calculado en la sección, partiendo de los criterios de separación entre barras establecidos en [11]. Los resultados del diseño final se muestran en la figura 6.



**Figura 6:** Distribución tentativa de las barras longitudinales de refuerzo

La modificación que ha experimentado el peralte efectivo de la sección ( $d$ ), al pasar de una a dos capas de refuerzo, modifica la cuantía de refuerzo y con ella la necesidad de ajustar todas las variables del modelo. Estos valores de peralte efectivo son:

$$\text{Para el acero: } d_s = 48 \text{ mm para el cual } d_{ss} = 550 - 48 = 502 \text{ mm}$$

$$\text{Para el PRFV: } d_f = 94 \text{ mm para el cual } d_{ff} = 550 - 94 = 456 \text{ mm}$$

Se vuelven a calcular las deformaciones y las tensiones para el valor de profundidad de la línea neutra ( $c$ ) calculado anteriormente:

Para el acero

$$\varepsilon_s = 0,0091 \text{ fluye } \therefore f_s = f_y = 300 \text{ MPa}$$

Para el PRF

$$\varepsilon_f = 0,008; f_f = \varepsilon_f * E_f = 0,008 * 50000 = 454 \text{ MPa}$$

Una vez obtenidas se puede pasar a comprobar el momento resistente según la ecuación 4

$$\phi M_n = 144 * 10^6 N.m$$

Verificándose que, para el refuerzo calculado y la distribución propuesta, la viga resiste:

$$M_u \leq \phi M_n$$

$$70kN.m \leq 144kN.m$$

### 3. CONCLUSIONES

A partir del estudio de los modelos analíticos y bases para el diseño establecidos en los códigos ACI 318-14 [9], ACI 440 1R-15 [10] y ACI 440 2R-08 [13] para el diseño de elementos de hormigón armado con acero y PRF respectivamente, se logra identificar dentro del diagrama de dominios una región común que satisface los requisitos de diseño dispuestos para cada material. Se brinda una propuesta de metodología para el diseño de vigas de hormigón armado reforzadas con armadura híbrida (acero-PRFV), teniendo como premisa un diseño sin refuerzo estructural en compresión ( $A'_f = 0$ ) y con valores de profundidad de la línea neutra entre  $0,231d$  y  $0,375d$ , para garantizar las hipótesis de diseño establecidas por los reglamentos tanto para estructuras de hormigón armado con acero como con PRF.

### 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Behnam, B., Eamon, C. "Reliability-based design optimization of concrete flexural members reinforced with ductile FRP bars", *Construction and Building Materials*, vol. 47, no. 942-50, 2013.
- [2] Mustafa, S., Hassan, H. "Behavior of concrete beams reinforced with hybrid steel and FRP composites", *HBRC Journal*, vol. , no. ,2017.
- [3] Pang, L., Qu, W., Zhu, P., Xu, J. "Design Propositions for Hybrid FRP-steel Reinforced Concrete Beams", *Journal of Composites for Construction*, vol., no., 2015.
- [4] Park, K-T., Kim, H-Y., You, Y-J., Lee, S-Y., Seo, D-W., editors. "Hybrid FRP Reinforcing Bars for Concrete Structures", 4th Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, December, Melbourne, Australia; 2013.
- [5] Hwang, JH., Seo, D. W., Park, K. T., You, Y. J. "Experimental study on the mechanical properties of FRP bars by hybridizing with steel wires". *Engineering*, vol. 6, no. 07, pag:365, 2014.
- [6] Qin, R., Zhou, A., Lau, D. "Effect of reinforcement ratio on the flexural performance of hybrid FRP reinforced concrete beams", *Composites Part B: Engineering*, 108:200-9, 2017.
- [7] Bencardino, F., Condello, A., Ombres, L. "Numerical and analytical modeling of concrete beams with steel, FRP and hybrid FRP-steel reinforcements", *Composite Structures*, vol.140, p. 53-65.,2016
- [8] Ju, M., Park, G., Lee, S., Park, C. "Bond performance of GFRP and deformed steel hybrid bar with sand coating to concrete", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol.36, no. 6, p. 464-75, 2017.
- [9] ACI-318. *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. 2014. p. 524.
- [10] ACI-440-1R. *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforcing with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*, 2015.
- [11] Wainshtok, H. *JAHCyldCDP. Calidad y durabilidad de las Construcciones. El uso de los PRF como refuerzo del hormigón armado y el ferrocemento*. Valencia, España, 200 p, 2017.
- [12] NC 207: 2019 *Requisitos Generales para el Diseño y Construcción de Estructuras de Hormigón*, (2019).
- [13] *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, (2008).